

hogy melyik helyen találjuk meg a részecskét, csak akkor derül ki, mikor megmérjük, hogy hol van. Amint megmérjük, hogy például az A oldalon van-e a részecske és azt találjuk, hogy ott van (illetve nincs), ekkor abban a szempillantásban meghatározottá válik, hogy a másik oldalon nincs (illetve van). Az A és B helyeken történő részecske helymeghatározás akkor is antikorrrelációt fog mutatni, ha a két mérés között a $t = d/c$ időnél rövidebb idő telik el, ahol d a két hely távolsága és c a vákuumbeli fénysebesség. Ezekről a kérdésekről lásd bővebben [10, 11] Geszti Tamás cikkeit!

Irodalom

1. Gyulai J.: Az anyagtudomány apoteózisa. *Fizikai Szemle* 46/8 (1996) 264.
2. Márk G. I.: A modern fizika alapjai a műszaki menedzser-képzésben – *Fizikai Szemle* 47/9 (1997) 298.

3. D. F. Styer: Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics* 64 (1996) 31–34.
4. E. Schrödinger: Quantisierung als Eigenwertproblem (Zweitere Mitteilung). *Ann. Phys.* 79 (1926) 489.
5. Márk G. I.: Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban. *Fizikai Szemle* 61/6 (2006) 190.
6. G. I. Márk, L. P. Biró, J. Gyulai: Simulation of STM images of 3D surfaces and comparison with experimental data: carbon nanotubes. *Phys. Rev. B* 58 (1998) 12645.
7. G. I. Márk, L. P. Biró, P. Lambin: Calculation of axial charge spreading in carbon nanotubes and nanotube Y-junctions during STM measurement. *Phys. Rev. B* 70 (2004) 115423-1.
8. Rajkovits Zs.: Szerkezeti színek az élővilágban. *Fizikai Szemle* 72/4 (2007) 121.
9. D. F. Styer: Quantum revivals versus classical periodicity in the infinite square well. *American Journal of Physics* 69/1 (2001) 56–62.
10. Geszti Tamás: Párolt macska. *Fizikai Szemle* 47/5 (1997) 157.
11. Geszti Tamás: Kvantum és klasszikus határán. *Fizikai Szemle* 58/6 (2008) 209.

KOZMIKUS SUGÁRZÁS, IDŐJÁRÁS, ÉGHAJLAT: HOL A HIÁNYZÓ LÁNCSZEM?

Kiss Péter¹, Csabai István¹, Lichtenberger János², Jánosi Imre¹

¹ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

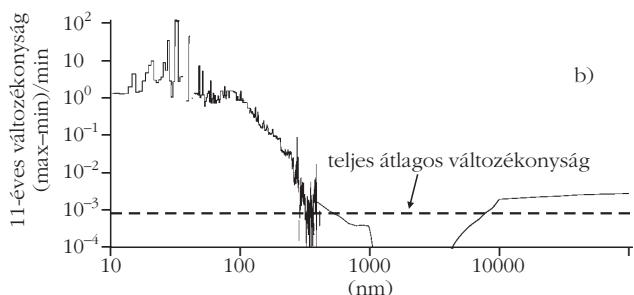
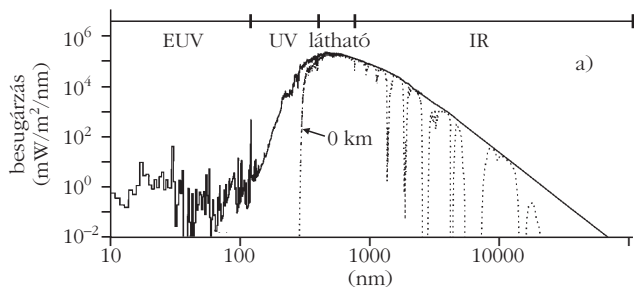
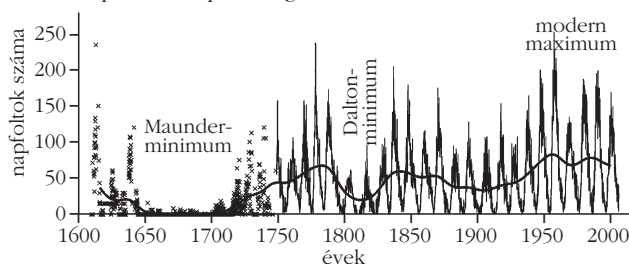
²ELTE TTK Úrkutató Csoport

A bolygónk felszínén lejátszódó természeti folyamatok túlnyomó részét végső soron a Napból érkező sugárzási energia hajtja, ezért igen kézenfekvő feltételezés, hogy a naptevékenység jellemzőiben bekövetkező változások szoros csatolásban állhatnak az éghajlati és időjárási jelenségekkel [1]. Nem valószínű, hogy az 1. ábrán látható napfoltgyakoriság adatsora túl sok Olvasónak jelentene újdonságot. A napfoltgyakoriság nagyjából 11 éves ciklikusságát (Samuel Heinrich Schwabe, 1843) közvetlen csillagászati megfigyelések alapján egészen Galilei 1610 körüli észleléseitől visszamenőleg sikerült kimutatni. A pontos földi és műholdas mérések az utolsó néhány napciklus ideje alatt sok ismeret összegyűjtését tették lehetővé, ezért valószínűleg hasonlóan ismerős a 2.a ábra is, ami a beérkező elektromágneses sugárzás energiasűrűségének eloszlását mutatja a hullámhossz függvényében (*Planck*-görbe). A légkör optikai szűrőhatásairól sem érdemes itt sokat értekezni. Különösen az ózonlyuk megjelenése óta tekinthető közismertnek, hogy az ultrabolya (UV) és extrém-ultrabolya (EUV) komponensek gyakorlatilag nem érik el a Föld felszínét (2.a ábra, pontozott vonal), legalábbis rendes körülmények között.

nyében (*Planck*-görbe). A légkör optikai szűrőhatásairól sem érdemes itt sokat értekezni. Különösen az ózonlyuk megjelenése óta tekinthető közismertnek, hogy az ultrabolya (UV) és extrém-ultrabolya (EUV) komponensek gyakorlatilag nem érik el a Föld felszínét (2.a ábra, pontozott vonal), legalábbis rendes körülmények között.

2. ábra. a) A Napból érkező elektromágneses sugárzás energiasűrűségének eloszlása a légkörön kívül (folytonos vonal), illetve a Föld felszínén (pontozott vonal) a hullámhossz függvényében. b) A 11 éves napfoltciklusok során mért spektrális változékonyság ([2] nyomán).

1. ábra. Rekonstruált napfoltgyakoriság a 17. század elejétől. A grafikon bal felén látható keresztek a korai, kevésbé megbízható adatokat jelzik. A folytonos vastag vonal a 11 éves futó átlag, amelyen a hosszútávú ingadozást jellemző szakaszok nevét föltüntettük (<http://en.wikipedia.org>).

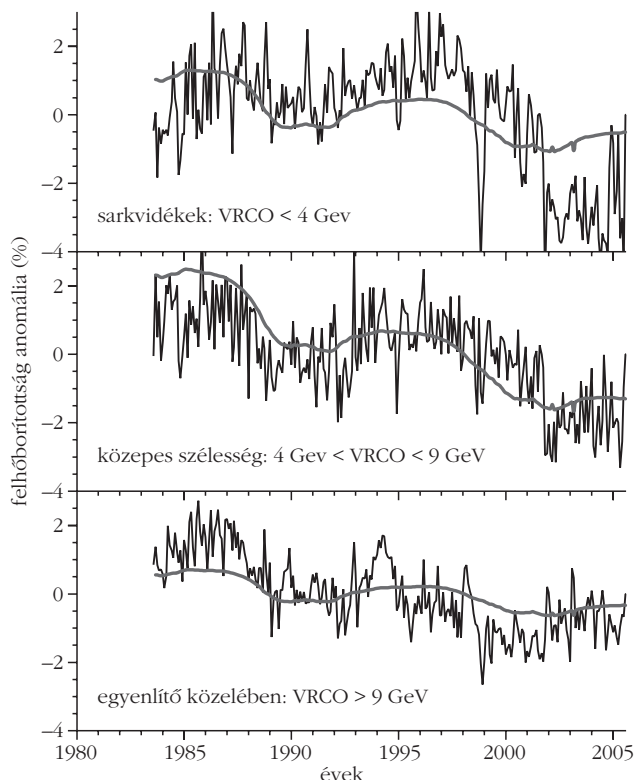


Talán nem ennyire közismert a *2.b ábrán* vázolt görbe, amely egy tipikus napciklus maximum- és minimumértékeinél mutatja a spektrális eloszlásfüggvények különbségét. Először is érdemes megjegyezni, hogy a napfoltgyakoriság maximumaihoz és minimumaihoz tartozó teljes sugárzási intenzitásban mindössze 0,1% különbség tapasztalható (*2.b ábra*, vízszintes szaggatott vonal). Eközben egyre több környezeti jelenségben vélték fölfedezni a naptevékenység változékonyságának hatását, például az *1. ábrán* jelzett *Maunder*-minimumot (a napfoltok szinte teljes hiányát) sokan az Európában komoly válságok sorával jellemzett „kis jégkorszak”-kal látják ok-okozati összefüggésben. De hogyan vezethet néhány tizedszázaléknyi sugárzási intenzitásváltozás ilyen komoly éghajlati eltolódásokhoz? Arról nem is beszélve, hogy ez a tized-százaléknyi változás is a spektrum EUV és UV tartományában összpontosul (*2.b ábra*), ami a légkör legfelső rétegeiben elnyelődik. Miféle csatolási mechanizmus létezhet, amely az atmoszféra tetején bekövetkező változásokból felszíni éghajlati kilengéseket eredményez?

A kozmikus sugárzás hipotézis

Nagyjából másfél évtizeddel ezelőtt elég nagy visszhangot keltett a főleg *Henrik Svensmark* dán fizikus nevéhez köthető elmélet, amely a hiányzó láncszemet a kozmikus sugárzásban vélte fölfedezni [3]. A Napból (hasonlóan egyéb kozmikus forrásokhoz) az elektromágneses sugárzás mellett nagy intenzitású részecskezár is érkezik (napszél), amely sok más összetevő mellett főleg alacsony és közepes energiájú protonokból, valamint elektronokból áll [4, 5]. Az elektromosan töltött részecskék kölcsönhatásba lépnek a Föld mágneses terével, pályájuk módosul, és többek között egy sor látványos légköroptikai jelenség, például a sarki fény okozói [6]. Az alacsonyabb energiájú töltött részecskék többsége nem éri el a Föld felszínét, bár behatolási mélységük jóval nagyobb, mint az EUV és UV sugárzásé. Lényeges viszont az a tény, hogy a részecskesugárzásnak a napciklus maximumához és minimumához tartozó intenzitásváltozása 15% körüli, azaz két és fél nagyságrenddel nagyobb, mint az elektromágneses sugárzásé. A *Svensmark*-féle hipotézis szerint a troposzférába hatoló kozmikus részecskéknek jelentős szerepe van a felhőképződés mikroszkopikus folyamataiban.

E feltevés igazolására a *3. ábrán* láthatóhoz hasonló görbéket szoktak bemutatni. Annak oka, hogy szándékosan nem az eredeti közlemények egyikét idézzük az, hogy mind a mai napig nem jutott nyugvópontra az a szakmai vita, ami a bizonyítékok hitelessége körül bontakozott ki. A *3. ábrán* az alacsony magasságú (< 3–4 km) felhőborítottság anomáliájának idősora látszólag meggyőzően mutatja a napciklussal egybeeső 11 éves ingadozást, különösen a közepes földrajzi szélességekhez tartozó sávban (*3. ábra*, középső grafikon). Az alapadatok a Nemzet-

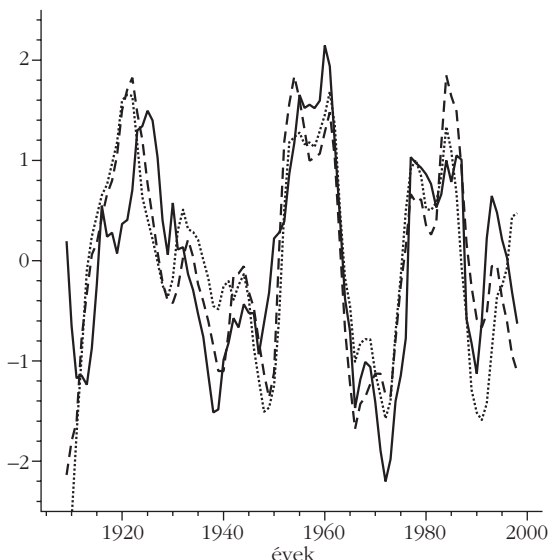


3. ábra. A felhőborítottság anomáliája (eltérés a hosszútávú éghajlati átlagoktól) és az illesztett napfoltszám-ingadozás (vékony folytonos vonal) az idő függvényében, három földrajzi régióra. A VRCO (angolul: *vertical rigidity cut off*) érték a kozmikus sugárzás részecskéinek azon energiaküszöbét jellemzi, ami egy adott földrajzi helyen a földfelszín eléréséhez szükséges, függőleges beesési irányt feltételezve ([7] nyomán).

közi Műholdas Felhő Klímatalógiai Projekt (angolul: *International Satellite Cloud Climatology Project*, ISCCP) adatbankjából származnak, és infravörös távérzékelésen alapulnak (<http://isccp.giss.nasa.gov>). A napciklus illesztése valójában a kozmikus részecskesugárzás intenzitását veszi alapul [7], ami a napfoltok gyakoriságváltozásával pontosan ellentétes előjelű (azaz napfoltminimum idején maximális a napszél fluxusa).

Még abban sincs egyetértés, hogy a görbéken látható monoton csökkenő trend vajon valódi fizikai (éghajlati) effektus-e, vagy a műholdra szerelt érzékelők fokozatos előregedésével kapcsolatos. A vita eldöntését különösen nehezíti, hogy a különböző csoportok jobb híján ugyanabból az ISCCP adatbankból dolgoztak, néha kiegészítve azt különösen megbízhatatlan felszíni észlelésekkel.

Az elmélet ellenzőinek főbb érvei, hogy (i) a *3. ábrán* látható korreláció nem feltétlenül jelent ok-okozati összefüggést (igaz), (ii) a magasabb szintű felhőknél még ez a korreláció is eltűnik (erre utalnak az adatok), illetve (iii) a felhőborítottság nem követi a kozmikus részecskesugárzás rövid idejű, nagy amplitúdójú „kilengéseit” (erre még visszatérünk). Az elmélet támogatói hangsúlyozzák, hogy a globális felhőészlelések még csak nagyon kezdeti stádiumban járnak, sok hibával és bizonytalansággal (igaz), és a korrelációkat valódi fizikai csatolásokkal lehet ma-



4. ábra. Hosszútávú ingadozás az éghajlati átlagok körül: a Paraná-folyó vízhozama (folytonos vonal), a napfoltok száma (szaggatott vonal) és a felszíni besugárzás erőssége (pontosított vonal). Mindhárom mennyiség standardizált formájú (aritmetikai átlag kivonva, szórással normálva), ezért a függőleges tengely dimenziótlan ([8] nyomán).

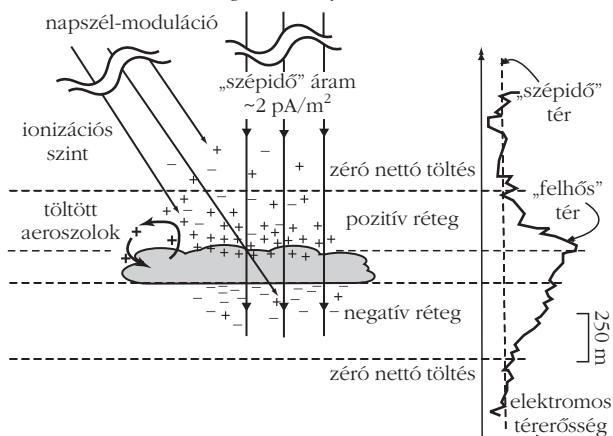
gyarázni. Ez utóbbi érvet támasztják alá például a 4. ábrán bemutatott érdekes eredmények is, amelyek a Paraná-folyó hosszú idejű vízhozam-ingadozásában találják meg a naptevékenységgel fennálló szignifikáns korrelációt [8]. Hangsúlyozzuk, hogy ez nem a 11 év körüli napciklus, hanem az 1. ábrán is látható gyakoriság-maximumok „modulációjával” kapcsolatos. A vízhozam esetében tényleg nem sok egyéb lehetséges magyarázat adódik, mint hogy a vízgyűjtő területre hulló csapadék mennyiségének kell követnie valahogyan a Nap aktivitásának változásait, ez pedig a felhőképződéssel szorosan összefüggő folyamat. Megjegyezzük, hogy saját vizsgálataink során ugyanezt a korrelációt nem sikerült kimutatnunk a Duna hasonlóan hosszú időszakot lefedő, napi vízálási adataiban. Persze érvelhetünk azzal, hogy teljesen más az éghajlati terület, vagy megemlíthetjük a Dunán épített 59 duzzasztó-szabályozó gátat is. De tény az is, hogy a naptevékenység ingadozása a különféle jelenségekben csak nagyon gyenge háttérjelként jelentkezik, ezért a meggyőző kimutatása nem is olyan egyszerű.

Mi lehetne a kozmikus részecskék és a felhőképződés csatolási mechanizmusa? A vezető elmélet szerint a csatolás a töltött részecskék ütközéses ionizáló hatásával kapcsolatos. Bizonyos „nyomgáz” molekulákból (elsősorban H_2O és H_2SO_4) keletkező ionok nanométer nagyságú aeroszolok (nano-cseppecskék) kialakulását segíthetik elő, amit sok helyen meg is figyeltek. E cseppecskék aztán szerencsés esetben egy kritikus nagyságot elérve stabil kondenzációs magokká válhatnak, ami az elképzelések szerint a felhőképződés alapja lehet. A kondenzációs magokból kialakuló makroszkopikus cseppek eső formájában folyamatosan „kiürülnek” a troposzférából, ezért a folyamatos felhőképződés és csapadék-utánpótlás

nem képzelhető el a kondenzációs magok állandó keletkezése nélkül. Ha ennek tényleg döntő lépése a kozmikus részecskék kiváltotta ionizáció, akkor a részecskezapor intenzitásának változásai szükségképpen megjelennek a felhőképződés és a csapadék ingadozásaiban is [1, 9]. A kondenzációs magokhoz szükséges légköri aeroszolok koncentrációját sok más folyamat is erősen befolyásolja: például a vulkáni vagy az emberi tevékenység (gondoljunk csak a repülőgépek mögött kialakuló „kondenzcsíkokra”). Az ilyen forrásokból származó ingadozásokat elvileg el lehet különíteni a kozmikus részecskék hatásaitól. A vulkánkitörések, nagy kiterjedésű erdőtüzek vagy gyárak által kibocsátott SO_2 szennyezés jól lokalizált, erős kilengéseket okoz, ezzel szemben a kozmikus sugárzás hatása a várakozások szerint sokkal gyengébb, de globális.

Az egyéb elképzelések közül talán érdemes még megemlíteni a már meglévő felhők és a kozmikus részecskék kölcsönhatását taglaló elmélete(ke)t. Tapasztalati tény, hogy nemcsak a látványos zivatarfelhők, hanem az alacsonyan elhelyezkedő, vékony rétegfelhők környékén is erősen inhomogén a töltéseloszlás (5. ábra). Ennek egyszerűsített magyarázata, hogy a felhősáv belseje még a levegőnél is rosszabb vezetőnek számít, mert ott a cseppecskék miatt a kis méretű ionok kiürülnek a légtérből, mozgékonyaságuk csökken [1]. A globális „szépidő” áram ($1,5\text{--}2\text{ pA/m}^2$), ami az ionoszféra és a földfelszín között „csordogál”, kialakít egy tértöltést, ami a felhősáv fölött egy $200\text{--}300\text{ m}$ vastag nettó pozitív, alatta nettó negatív töltésű rétegből áll. Ez a tértöltés aztán beállítja a „szükséges” áramerősséget a felhő belsejében. Innen kezdve az elmélet különböző variációi jócskán elbonyolódnak. A közös pont bennük az, hogy a töltésmegosztás miatt e rétegek különösen érzékenyek az ionizáló háttérsugárzás moduláló hatásaira. A további részletek és egyéb elméletek ismertetésétől eltekintünk, ugyanis egyelőre számszerű mérések e folyamatokkal kapcsolatban nem léteznek, ezek hiányában pedig a spekulációk jobbra csak különféle becsléseken alapulnak.

5. ábra. Az alacsony magasságú, vékony rétegfelhők környékén észlelt tipikus függőleges elektromos töltéseloszlás és térerősség vázlata; részletek a szövegben ([1] nyomán).



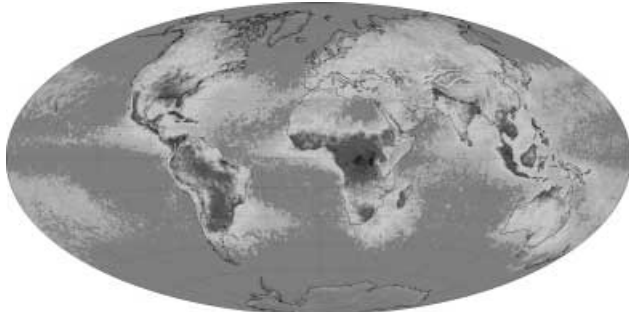
Kapcsolat a villámokkal

Az 5. ábra arra mindenképpen jó, hogy segítsen kihangsúlyozni a felhők körüli elektromos töltésmegosztás általános jelenlétét. A rendszeren kifejezett zivatarfelhőkben, amelyek akár a troposzféra felső határát (10–11 km) is elérik, a töltések erősen inhomogén eloszlásának mindenki által ismert következménye az intenzív villámtevékenység. E felhőkben sokkal nagyobb elektromos télerősséértékek, és nem ritkán 6–8 váltakozó előjelű töltött réteg fölépülése a jellemző [10]. A villámjelenségek tanulmányozása is szép múlttal rendelkezik, az egyre modernebb mérőeszközök és kísérletileg létrehozott légköri kisülések segítségével egyre több részletet sikerült megmagyarázni. Itt most nem célunk a villámok fölépülési folyamatainak és különböző tulajdonságainak taglalása, egyetlen kivételtől eltekintve.

Laboratóriumi körülmények között viszonylag egyszerű meghatározni, hogy az átlagos összetételű levegőben az elektromos átütési feszültség, azaz a spontán ívkisülés létrehozásához szükséges kritikus elektromos télerősség nagysága a felszíni nyomáson közel 3000 kV/m (lásd [10], 3. fejezet). Ezzel szemben több tucatnyi ballonos mérés során, amelyekkel sikerült a télerősség magasságfüggését eléggé pontosan meghatározni aktív zivatarfelhők belsejében, nemigen találtak 150 kV/m-nél nagyobb csúcserősségeket (a valaha mért abszolút maximum 400 kV/m körüli volt). Jogosan merül föl a kérdés, hogy akkor mi indítja el a kisülési folyamatot?

Természetesen itt sincs hiány a tetszetős magyarázatokban, de mielőtt ezekre fordulna a figyelmünk, ejtsünk néhány szót a villámok észleléséről. Érdemes megnézni az Országos Meteorológiai Szolgálat honlapján látható villámtérképet (<http://www.met.hu/kepek/index.php?id=blhh>). Ha szerencsénk van, akkor igazán látványosan rajzolódnak ki a Kárpát-medence térségében az előző fél óra heves zivatargócai. Aki ennél nagyobb területre kíváncsi, bátran látogasson el a <http://wwln.net> címre, ahol nagy meglepetésben lehet része: szemmel követheti a földgolyó teljes területén zajló villámaktivitást! A rövidítés a Villám Lokalizációs Világhálózat (angolul: *World Wide Lightning Location Network*, WWLLN) szerveződésre

6. ábra. A globális villámgyakoriság földrajzi eloszlása, ahol a szürkességi szint arányos a villámkisülések sűrűségével. Afrika közepén, például a fekete foltok 50 villám/km²/év értékhez tartoznak, az amerikai kontinenseken pedig a csúcserősség 30 villám/km²/év körül alakul (<http://visibleearth.nasa.gov/>).

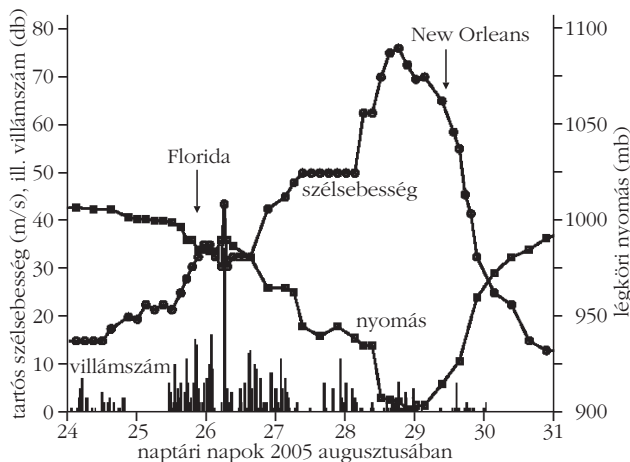
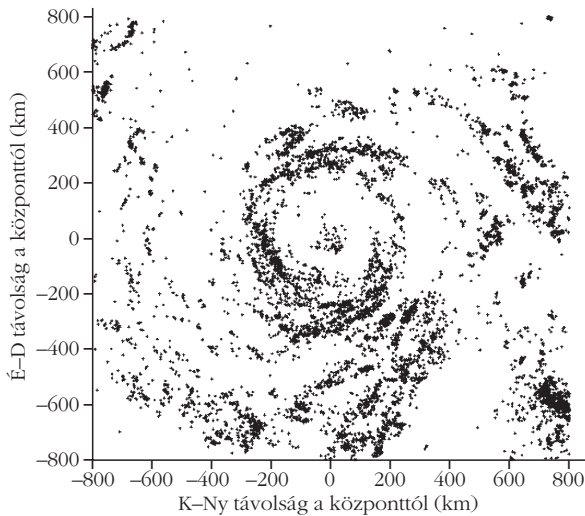


utal, amely a (cikk írásának időpontjában) 40 önkéntes mérőállomás adatai alapján határozza meg a villámkisülések helyét, méghozzá pár kilométeres pontossággal, és körülbelül 4% globális hatásfokkal. A budapesti mérőpontot az ELTE TTK Űrkutató Csoportja üzemelteti (<http://sas2.elte.hu>).

A távolsági villámlokalizáció elve tulajdonképpen nem bonyolult. A kisülések jelentős amplitúdójú elektromágneses zavarjeleket sugároznak ki az alacsony rádiófrekvenciás sávban is (1–25 kHz). Ezek speciális tulajdonsága, hogy a földfelszín és az ionoszféra közti „üregrezonátorban” csekély csillapodásuk miatt nagyon nagy távolságra jutnak el, akár a teljes Földet megkerülhetik. Már egy egyszerű rádióvevő is alkalmas a villámok által gerjesztett impulzussorozatok vételére. Ha van legalább 4, nagy pontossággal szinkronizált, nagy távolságban elhelyezkedő vevőnk, akkor a jelek beérkezési idejének különbségeiből egy nem túl bonyolult algoritmus segítségével meghatározható a villámforrás helye (3 állomás nem elegendő, az előbb említett, Földet megkerülő jelterjedés miatt). Ehhez persze ismerni kell a rádiójel terjedési sebességét, a csillapodás mértékét, be kell azonosítani az ugyanazon eseményhez tartozó impulzusokat, és egy sor más részletre is figyelni kell. Nem véletlen, hogy a WWLLN adatbázisba csak azok a villámkisülések kerülnek rögzítésre, melyeket legalább 5 állomás párhuzamos észlelése alapján lehetett azonosítani.

Egy ilyen hálózattal el lehet készíteni például a 6. ábrán látható térképet, amely a villámlás gyakoriság-eloszlását ábrázolja egy év adatai alapján. Még egy felületes szemrevételezés is elég egy sor következtetés levonásához. Például jól látszik, hogy a villámok keletkezéséhez legjobb helyek az egyenlítői övezetben, a kontinensek fölött találhatók. Ez persze megfelel a várakozásainknak, mert a jelentős zivatarokat eredményező „szupercellák” fölépüléséhez erős hőmérsékleti konvekció szükséges, erre pedig a feltételek leginkább az erősen besugárzott szárazfölközök fölött adódnak. A felhőkhöz elegendő vízpára is szükséges, ezért érthető az afrikai kontinens fölötti erős aszimmetria. Az igazán érdekes észlelések persze nem a globális átlagokkal kapcsolatosak, hanem kihasználják a hálózat nagy időbeli és térbeli felbontóképességét.

Egy példát mutat erre a 7. ábra, amely a nevezetes Katrina hurrikán körzetében illusztrálja a térbeli pontosságot (ennek alapján könnyen magunk elé képzelhetjük a jellegzetes műholdas felhőképeket). A 7. ábra alsó grafikonján látszik, hogy érdekes módon a villámaktivitás maximuma nem esik egybe a hurrikán legerősebb fázisával, amikor a szélesség maximális a középponti nyomáseséssel együtt. Egy későbbi tanulmányban 58 hurrikán közelében elemezték a villámaktivitást a WWLLN adatai alapján, és azt találták, hogy hasonlóan a 7. ábra adataihoz, a villámtevékenység maximális intenzitása a vihar legerősebb fázisánál közel 30 órával korábban tapasztalható [12]. Erre a szerzők még csak spekuláció szintjén sem próbáltak meg magyarázatot találni, ehhez valószínűleg sokkal több részlet ismerete lesz szükséges. Ugyanakkor nem tár-



7. ábra. A WWLLN hálózattal lokalizált villámcsapáshelyek 2005. augusztus 28-án (felül), és a villámcsapásszámok időbeli fejlődése az átlagos szélességgel és a középponti nyomással együtt (alul). A Katrina hurrikán kétszeri földet érését nyilak jelzik ([11] nyomán).

gyaltak egy másik érdekességet sem, ami pedig már az adatok alapján szembeötlő.

A Saffir–Simpson-skálán az elemzett 58 hurrikán mindegyike a legerősebb, 4-es és 5-ös kategóriájú trópusi vihar volt. Az azonos kategóriába eső vihartölcsérek egymáshoz nagyon hasonló szerkezetűek, mozgásuk pályája sem sokban különbözik egy-egy forrásvidék körzetében (például az atlanti viharok nagy része a Mexikói-öblöt átszelve kanyarodik észak-keleti irányba). Azt gondolhatnánk, hogy a hasonló felhőstruktúra, hasonló áramlási rendszer stb. miatt a villámtevékenység sem sokban különbözik, márpedig a megfigyelések ezt nem támasztják alá. A maximális villámgyakoriság akár két nagyságrendben is eltérhet, az óránkénti néhány tucattól a közel kétezer kisülésig terjedő tartományban [11, 12]. Ennek vajon mi lehet a magyarázata?

Itt kanyarodnánk vissza nyitó kérdésünkre, amely a villámkisülés eredetére vonatkozott. A komolyabb mérések elkezdéséig az általános elképzelés szerint a villámok is csak „szokásos” kisülések voltak, legföljebb nagyobbak annál, mint amelyeket a laboratóriumban tudnak gyártani. A már említett térerősség-probléma mellé azonban újak is fől sorakoztak: például Moore és

munkatársai észlelése, amely szerint a villámlással egy időben nagyenergiájú Röntgen- és gamma-sugárzás is föllép [13]. Mivel ehhez még a legnagyobb kisülések energiája sem elegendő, rögtön adódott a kozmikus részecskék hatásának ötlete: ha feltételezzük, hogy töltött kozmikus részecskék segítségével jön létre a villámok ionizált csatornája, akkor ez megmagyarázza a térerősség-problémát is, a villámláskor észlelt nagyenergiás sugárzással együtt. Innen pedig kézenfekvő, hogy megnézzük a globális villámaktivitás és kozmikus részecskefluxus esetleges kapcsolatát.

A villámok távérzékelő hálózatai csak az utóbbi években épültek föl, ezért nincsenek még olyan hosszú adatsorok, amiket egy napciklussal össze lehetne vetni. Vannak ugyan hosszabb idejű műholdas megfigyelések, például a LIS (angolul: *Lightning Imaging Sensor*), aminek hátránya, hogy a műszer egy adott hely fölött naponta csak pár percig tartózkodik, 55 napot kell várni, hogy ugyanakkor nézzen ugyanarra a $670 \times 670 \text{ km}^2$ nagyságú területre (<http://trmm.gsfc.nasa.gov>).

Szerencsére vannak a kozmikus részecskefluxusnak olyan rövid idejű, nagy amplitúdójú kilengései, amelyek esélyt adhatnak a korrelációk kimutatására. Ilyenekre jó példa az úgynevezett *Forbush*-esemény, vagy a Naptól érkező protonzárók esete. Az előbbi nagyerejű napkitörések után lép föl, amikor a napszél plazmájának mágneses tere a kozmikus részecskék egy jó részét „kisöpri” a Föld közeléből. Ennek mérhető hatása, hogy mind a légkörön kívüli proton- és elektronfluxus, mind pedig a földfelszínre érkező másodlagos neutronfluxus jelentősen csökken néhány napos időtartamra. A protonzáró is hasonló okokra vezethető vissza, csak éppen jelentős nagyságú, impulzusszerű fluxusnövekedéssel jár. Ez is a napkitörések során kirepülő plazmából származik, annak legnagyobb energiájú komponense alkotja, amely képes áttörni a Föld mágneses terét.

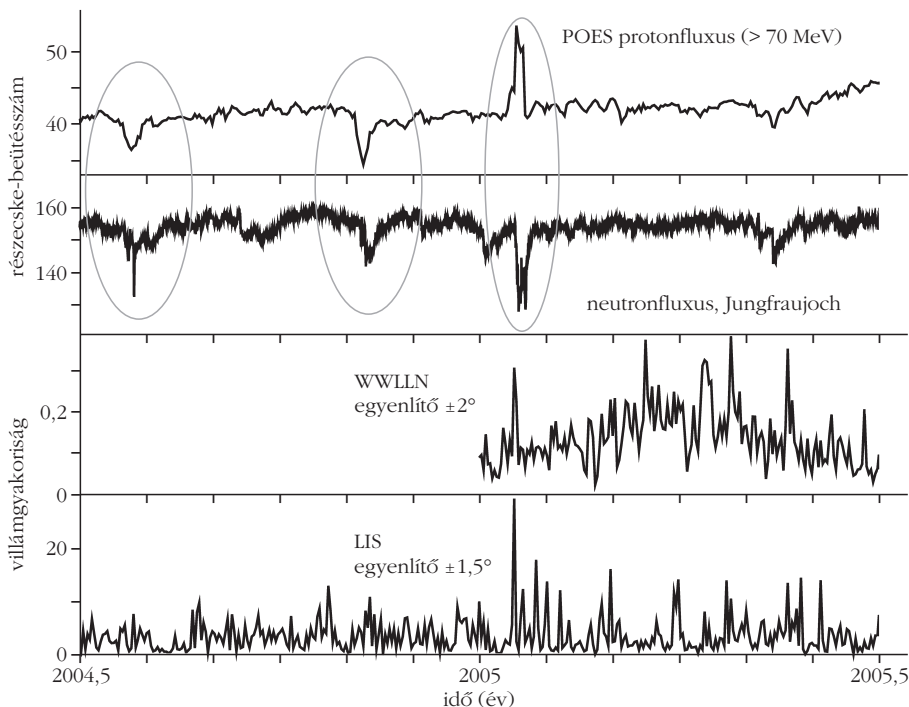
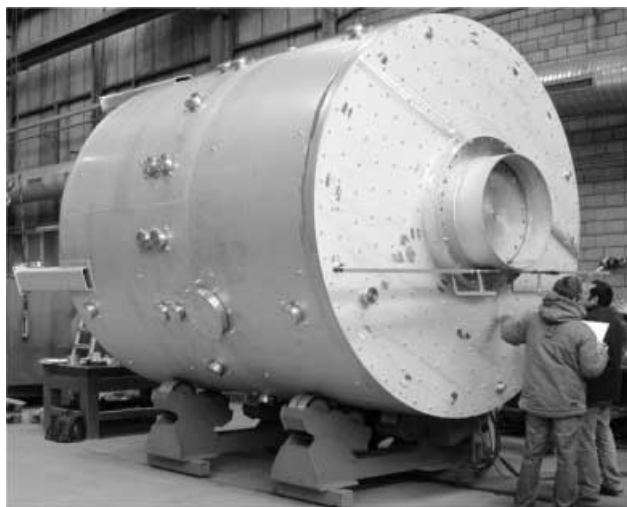
Más csoportokhoz hasonlóan, nekünk sem sikerült kimutatnunk statisztikailag szignifikáns korrelációt a villámtevékenység intenzitása és a kozmikus részecskefluxus alkalmanként bekövetkező kilengései között. A 8. ábra egy tipikus negatív eredményt illusztrál. Legfölül az egyik POES műhold (angolul: *Polar Orbiting Environmental Satellites*, <http://www.swpc.noaa.gov>) egyik protondetektorának idősora látható, amely 700–800 km magasságban méri a Föld felé érkező részecskefluxust több energiasávban. Alatta a kiterjedt földi neutrondetektor hálózat egyik svájci állomásának adatai láthatóak. Mindkettőn kitűnően látszik két „tisza” Forbush-esemény, illetve a 2005. január 15-i protonzáró (ami egy Forbush-minimum közepén következett be). Ha ezt összehasonlítjuk két villámadatsorral (8. ábra, alul), akkor láthatjuk, hogy nemigen figyelhető meg bármiféle korreláció. (A legelső idősor legnagyobb „tuskéje” a protonzáró előtt következett be!) Sok egyéb negatív kimenetelű kísérlet után be kellett látnunk, hogy a rendelkezésünkre álló adatokkal semmiféle korreláció sem mutatható ki a kozmikus részecskefluxusának ingadozása, illetve különböző helyi vagy a globális villámtevékenység között.

A végső válasz: CLOUD?

Számos próbálkozás ellenére a kozmikus részecske – felhő, illetve kozmikus részecske – vilám hipotézisek egyikét sem sikerült ez idáig meggyőzően bizonyítani a hozzáférhető adatok alapján. Minden hiányosság és pontatlanság ellenére biztosan kijelenthető, hogy ha létezik is ilyen kapcsolat, akkor az fölöttébb gyenge, alig kimutatható. Az elméletek támogatóiból álló (fogyatkozó) tábor élcsapata minden bizonnyal Genfben található, ahol teljes gőzzel folyik a végső választ megadni kívánó projekt előkészítése.

E projekt, a CLOUD (a betűszó magyarul „felhő”, a teljes elnevezés angolul *Cosmics Leaving Outdoor Droplets*, lefordíthatatlan), a tervek szerint 2010–2011 környékén tisztáznia fogja a sok nyitott kérdést, méghozzá igen alapos kísérletek sorozatával. A berendezés alapja egy nagyméretű aeroszol tartály (9. ábra), amiben a fizikai paraméterek és kémiai összetevők rendkívül pontosan kontrollálhatók, továbbá az elérhető nyomás- és hőmérséklet-tartomány lefedi a Föld minden éghajlati területét az egyenlítőtől a sarkokig. A berendezés a Nemzetközi Részecskefizikai Kutatóközpont (CERN) Genf melletti alagútjában kerül fölállításra, amelyben a nagy gyorsítóból kicsatolt mellékágon keresztül kontrollált fluxussal érkezik a „kozmosz” részecskék zápora. A néhány éve elkezdett előzetes kísérletek legfőbb tanulsága, hogy hihetetlen mértékben kell ügyelni a

9. ábra. A 3 m átmérőjű CLOUD kamra végső munkálatai 2009 márciusában. A kamra falán körben különféle műszerek csatlakozói és az észlelőablakok nyílásai láthatók ([14] nyomán).



8. ábra. Műholdon mért protonfluxus (legfölül), a Jungfraujoch (Svájc) földi állomás neutronfluxusa (alatta), illetve egy WWLLN és LIS műholdas adatbázisból kinyert villámgyakoriság időfejlődése. Az első két ellipszis Forbush-eseményeket, a harmadik a Naptól érkező 2005. január 15-i protonzápor jelöli, részletek a szövegben.

tisztaságra, mert igen csekély nyomgázzsennyeződések is reprodukálhatatlanságot okoznak.

Mivel is zárhatnánk e talán szokatlanul sok kérdő mondatot tartalmazó írást? Egyelőre szilárd végkövetkeztetés hiányában izgatottan várjuk az eredményeket.

Irodalom

1. K. S. Carslaw, R. G. Harrison, J. Kirkby: Cosmic rays, clouds, and climate. *Science* 298 (2002) 1732–1737.
2. J. Lean, D. Rind: Climate forcing by changing solar radiation, *Journal of Climate* 11 (1998) 3069–3094.
3. N. D. Marsh, H. Svensmark: Low cloud properties influenced by cosmic rays. *Physical Review Letters* 85 (2000) 5004–5008.
4. L. I. Dorman: *Cosmic Rays in Magnetospheres of the Earth and other Planets*. Springer, New York, 2009.
5. Patkós A.: Részecskék az Univerzumban. *Fizikai Szemle* 57 (2007) 165.
6. A. W. Wolfendale, Király P.: Veszélyforrások és védőrendszerek kozmikus környezetünkben. *Fizikai Szemle* 49 (1999) 294.
7. T. Sloan, A. W. Wolfendale: Testing the proposed causal link between cosmic rays and cloud cover. *Environmental Research Letters* 3 (2008) 024001.
8. P. J. D. Mauas, E. Flamengo, A. P. Buccino: Solar forcing of the stream flow of a continental scale South American river. *Physical Review Letters* 101 (2008) 168501.
9. K. Carslaw: Cosmic rays, clouds and climate. *Nature* 460 (2009) 332–333.
10. H. D. Betz, U. Schumann, P. Laroche (szerk.): *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. Springer, New York, 2008.
11. N. N. Solorzano, J. N. Thomas, R. H. Holzworth: Global studies of tropical cyclones using the World Wide Lightning Location network. In: *AMS 2008 meeting in New Orleans* (<http://wwlln.net/publications>)
12. C. Price, M. Asfur, Y. Yair: Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency. *Nature Geoscience* 2 (2009) 329–332.
13. C. B. Moore, K. B. Eack, G. D. Aulich, W. Rison: Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders. *Geophysical Research Letters* 28 (2001) 2141–2144.
14. J. Kirkby: 2008 Progress Report on PS215/CLOUD. CERN-SPSC-2009-015, 2008. <http://cdsweb.cern.ch/record/1172365>